# – IceCube – Abenteuer Forschung am Südpol

Auf der Suche nach kosmischen Neutrinos

**Tilo Waldenmaier** 

Lehrerfortbildung DESY Zeuthen, 16. November 2009

# Was sind Neutrinos?



Neutrinos wechselwirken nur schwach und gravitativ

- $\rightarrow$  Schwer nachzuweisen
- → Große Reichweiten

#### "Kosmische Boten"



 $1 J = 0,62 \times 10^{19} eV = 6 EeV$ 

## Hochenergie Neutrino-Astronomie

#### Fragestellungen:

- Quellen der hochenergetischen Kosmischen Strahlung
- (Beschleunigungs-) Mechanismen in astrophysikalischen Objekten:
  - Photonen  $\rightarrow$  Von Hadronen oder Elektronen
  - Neutrinos  $\rightarrow$  Nur von Hadronen

$$p + N \rightarrow \pi^{+}, \pi^{-}, \pi^{0}, \dots$$

$$\downarrow \qquad \downarrow \qquad \downarrow \qquad \gamma + \gamma$$

$$\downarrow \qquad \downarrow \qquad \mu^{-} + \overline{v_{\mu}}$$

$$\downarrow \qquad \qquad \mu^{+} + v_{\mu}$$



- → Komplementäre Information zu Gamma-Strahlung
- → Multi-Messenger Programme: Gleichzeitige Beobachtung von Gammas + Neutrinos
- → Weit entfernte Objekte möglicherweise nur durch Neutrinos erkundbar

## Detektion hochenergetischer Neutrinos



#### Neutrinoteleskope Weltweit





## Reise zum Südpol







#### Am Südpol



#### **Amundsen-Scott Station**



### Der IceCube Detektor



## Der IceCube Detektor



#### IceTop:

- Luftschauer Detektor
- Veto und Kalibrierung f
  ür IceCube
- ➢ 80 Stationen mit je 2 Eis-Tanks
- 2 DOMs pro Tank mit unterschiedl. Verstärkungsfaktoren
- Stationsabstand: ~ 125 m
- Fläche: ~ 1 km<sup>2</sup>



## Digitales Optisches Modul





- Minimiere Signalverlust
- Minimiere Anzahl der Auslesekanäle (Kabel)
- Minimiere Datenaufkommen
- $\rightarrow$  PMT mit integrierter HV-Versorgung
- → Digitalisierung
- → Lokale Koinzidenz mit Nachbarn
- → Kalibrierung und Tests
- → Autonome Steuerung

Funktionsweise eines Photomultipliers (PMT):



15

DOM

#### **Bohrung und Installation**



#### Datenaufnahme



#### Wo alles Zusammenläuft: IceCube Lab



## Nachweisprinzip

Bei (schwachen) Wechselwirkungen von hochenergetischen Neutrinos mit der umgebenden Materie entstehen hochrelativistische geladene Teilchen die **Cherenkov-Licht** emittieren. **Dieses Licht kann nachgewiesen werden**.

 $\bullet$  geladenes Teilchen mit v > c/n



 $\rightarrow$  Unterscheidung der drei Neutrinotypen durch charakteristische Signaturen im Eis

## Myon-Neutrino Signatur



- Gerade Spur aus Richtung des Neutrinos (Winkelauflösung < 1°)
- Wechselwirkung kann außerhalb des aktiven Detektors geschehen

   größeres Nachweisvolumen
- Hoher Untergrund von Myonen aus der Kosmischen Strahlung
   Schaue nach unten!

## **Elektron-Neutrino Signatur**





- Gute Energiemessung (kalorimetrisch)
- Schlechte Richtungsbestimmung
- Wechselwirkung muß im aktiven Detektor stattfinden

### **Tau-Neutrino Signatur**

$$\nu_{\tau} + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z\pm 1}X + \tau^{\mp} (\tau_{\tau} = 2,9 \times 10^{-13} \text{ s})$$

$$\downarrow \downarrow l^{\mp} + \nu_{l} + \nu_{\tau}$$

$$\downarrow \bullet \text{ e.m. Kaskade / }\mu\text{-Spur}$$

$$\downarrow Hadronische Kaskade$$

$$V_{\tau}$$

$$I = 0$$

- $\bigcirc$  "Double-Bang" Signatur  $\rightarrow$  Niedriger Untergrund
- Sichtungsbestimmung möglich

Wechselwirkung muß im aktiven Detektor stattfinden

## Spur-Rekonstruktion

- Berechne Zeitunterschiede zwischen gemessenen Signalen und erwarteter Ankunftszeit für hypothetische Teilchenspur.
- Variiere Teilchen-Spur bis die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Erwartung gefunden ist
- → Finde das Minimum der Log-Likelihood Funktion:

$$L = -\sum_{i} \log(P(\vec{r}_i, t_i \mid \vec{r}_\mu, \theta_\mu, \varphi_\mu, t_\mu))$$



- → Winkelauflösung <  $1^{\circ}$
- → Wichtig: Gute Kalibrierung (Geometry, Zeit, Ladung) des Detektors und gute Kenntnis der Eiseigenschaften (Steuung, Absorption)

## Optische Eigenschaften des Eises

- Streuung an Staub und Blasen im Eis
- Absorption durch Staub und das Eis selbst.
- Staubschicht zw. 2000 und 2100 m Tiefe
- Intensive Messungen mit Kalibrationslichtquellen, präzisen Muonenspuren oder Auswertung von Bohrkernen.









#### **Der Luftschauer-Detektor IceTop**



### IceTop Zielsetzungen

- Veto gegen Muonen aus der Kosmischen Strahlung (1)
- (2)Cross-Kalibrierung von IceCube (Timing, Richtung, Energie)
- (3)Messung des Energiespektrums der Kosmischen Strahlung und Untersuchung der Elementzusammensetzung zwischen ca. 1 PeV und 1 EeV

10<sup>3</sup>

10





6

10

10

10<sup>5</sup>

IceTop

10

10

#### Energiespektrum der Kosmischen Strahlung

11

10

10

10 Energie pro Kern E (GeV)

## Koinzidente Ereignisse

Bestimmung der "Masse" (schwer mittel, leicht) des Primärteilchens aus dem Verhältnis zwischen nachgewiesenen Muonen im Eis und der an der Oberfläche gemessenen Energie.





## Koinzidentes Ereignis



#### **Die IceCube Kollaboration**

#### **USA:**

**Bartol Research Institute, Delaware** University of California, Berkeley University of California, Irvine Pennsylvania State University **Clark-Atlanta University Ohio State University** Georgia Tech **University of Maryland** University of Alabama, Tuscaloosa University of Wisconsin-Madison University of Wisconsin-River Falls Lawrence Berkeley National Lab. University of Kansas Southern University and A&M College, Baton Rouge University of Alaska, Anchorage

#### Schweden: Uppsala Universitet Stockholm Universitet

Großbritannien: Oxford University

Niederlande: Utrecht University

Schweiz:

#### **Deutschland:**

DESY-Zeuthen Universität Mainz Universität Dortmund Universität Wuppertal Humboldt Universität MPI Heidelberg RWTH Aachen

Belgien: Université Libre de Bruxelles

Vrije Universiteit Brussel Universiteit Gent Université de Mons-Hainaut Japan: Chiba University

33 Institute, ~250 Mitglieder http://icecube.wisc.edu Neuseeland: University of Canterbury

